

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В КИСЛОРОДНО-МЕТАНОВОМ МОДЕЛЬНОМ ГАЗОВОМ ТРАКТЕ

С.А. Федоров

Д.Ф. Слесарев

Д.В. Исаков

shamusmacduly@gmail.com

dendom68@mail.ru

isakovd93@gmail.com

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены два механизма образования углеродных отложений на металлической поверхности в условиях контакта с газовой фазой, содержащей продукты неполного сгорания кислородно-метанового генераторного газа. Первый — это так называемый механизм металлического пылеобразования (Metal dusting), продукты которого остаются на поверхности стенки и образуют углеродные отложения, второй связан с наличием в потоке газа углеродных частиц, которые осаждаются на стенку. Разработана экспериментальная установка, рабочий участок которой представляет собой модельный тракт кислородно-метанового генераторного газа восстановительного состава, и проведено экспериментальное исследование накопления углеродных отложений. При выборе тактико-технических характеристик экспериментальной установки учтены особенности газового тракта жидкостного ракетного двигателя, поэтому экспериментальная установка имеет характеристики, более близкие к ожидаемым характеристикам натурного газового тракта. Проведено сравнение интенсивности образования отложений на образцах из металлического материала и эталонного кварца. Установлено, что основным механизмом образования углеродных отложений является выпадение содержащейся в потоке генераторного газа сажи на стенку газового тракта. Масса отложений определена весовым способом. Выявлен диапазон соотношения компонентов топлива, в котором образование отложений минимально

Ключевые слова

Жидкостный ракетный двигатель, восстановительный генераторный газ, углеродные отложения, сажа

Поступила 07.04.2022

Принята 19.04.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. В настоящее время в России и за рубежом интенсивно разрабатываются жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) на компонентах топлива жидкий кислород + сжиженный природный газ с высоким (~ 98 % об.) содержанием метана, использующие для привода турбонасосного агрегата восстановительный генераторный газ [1–4], т. е. продукты сгорания, образовавшиеся в результате сжигания кислородно-метанового топлива при соотношении компонентов существенно меньше стехиометрического (коэффициент избытка окислителя $\alpha_{gr} \ll 1$).

Интерес разработчиков к техническим решениям с использованием восстановительного генераторного газа связан с тем, что в таком газе (по сравнению с окислительным генераторным газом) отсутствует свободный кислород, что исключает возможность зажигания конструкции посторонними частицами и поэтому положительно влияет на стоимость и надежность двигателя.

Сравнивая метан с другими углеродсодержащими горючими, используемыми в ракетно-космической технике (керосином, несимметричным диметилгидразином), экспериментально выявлено, что скорость образования углеродных отложений в тракте кислородно-метанового восстановительного генераторного газа существенно ниже, а количество сажи в газе примерно на два порядка меньше, чем в восстановительном генераторном газе на основе других углеродсодержащих горючих. Эта особенность метана потенциально является серьезным преимуществом перед другими углеродсодержащими горючими для ЖРД, так как относительно невысокая скорость образования углеродных отложений в газовом тракте позволяет существенно упростить и удешевить разработку и эксплуатацию ЖРД на кислородно-метановом восстановительном генераторном газе.

Для реализации этого преимущества, разработчикам ЖРД в первую очередь необходимо иметь данные по механизму образования углеродных отложений в газовом тракте, поэтому *цель настоящей работы* — получить эти данные.

Объект исследования — углеродные отложения в тракте кислородно-метанового восстановительного генераторного газа.

Газовый тракт ЖРД включает в себя газогенератор (как правило, имеющий наружное охлаждение), турбину, газопроводы и газовые полости смесительной головки камеры (в случае дожигания генераторного газа в камере) или выхлопное сопло (в случае отсутствия дожигания).

В состав движущегося по тракту генераторного газа, кроме CO_2 и H_2O , входят еще и продукты неполного окисления метана: CO , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 и др.

Известны два механизма образования углеродных отложений на металлической поверхности в условиях контакта с газовой фазой, содержащей продукты неполного сгорания углеводородного топлива.

Первый механизм достаточно широко рассматривается в зарубежной литературе [5–12], в которой он получил название Metal dusting (отечественный термин «металлическое пылеобразование»). Процесс Metal dusting — это гетерогенный физико-химический процесс распада (поверхностного слоя) металлических материалов на пыль, состоящую из мелких металлических наночастиц и углерода в виде графита или углеродных нанотрубок. Продукты этого процесса остаются на поверхности стенки и образуют углеродные отложения. Основные стадии (a)–(g) процесса Metal dusting приведены на рис. 1 [8]:

(a) углерод из газа переходит в поверхностный слой металла за счет протекания гетерогенной химической реакции. Диффузия (отток) поглощенного поверхностью атомарного углерода вглубь металла идет с меньшей скоростью, чем поглощение новых порций углерода, поэтому происходит увеличение содержания углерода в поверхностном слое;

(b) после насыщения поверхностного слоя углеродом сверх определенного предела в поверхностном слое образуется цементит Fe_3C ;

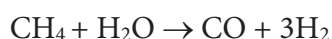
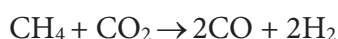
(c) дальнейшее насыщение углеродом приводит к разложению цементита на графит и железо;

(d) выделение графита при разложении цементита происходит в виде множества параллельных плоскостей, перпендикулярных поверхности и растущих вглубь цементита. Атомы железа диффундируют наружу между графитовыми плоскостями и агломерируют с образованием наночастиц размером 20 нм;

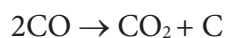
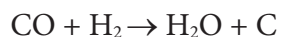
(e)–(f) каждая отдельная наночастица железа частью поверхности поглощает углерод из газа (аналогично стадиям (a)–(d)) и выделяет его на другой части поверхности в виде нановолокон с сечением, равным сечению частицы. Масса металлической частицы не превышает 5 % массы нановолокна;

(g) при разложении цементита ($t > 700$ °C) образуется слой железа между цементитом и поверхностным углеродом.

Химический механизм процесса Metal dusting:



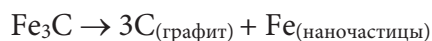
— газофазные реакции, приводящие к появлению в генераторном газе CO и H_2 ;



— реакции, приводящие к появлению атомарного углерода, поглощаемого поверхностью металла;



— насыщение поверхности углеродом вплоть до образования на ней цементита Fe_3C ;



— разложение цементита с образованием наночастиц железа.

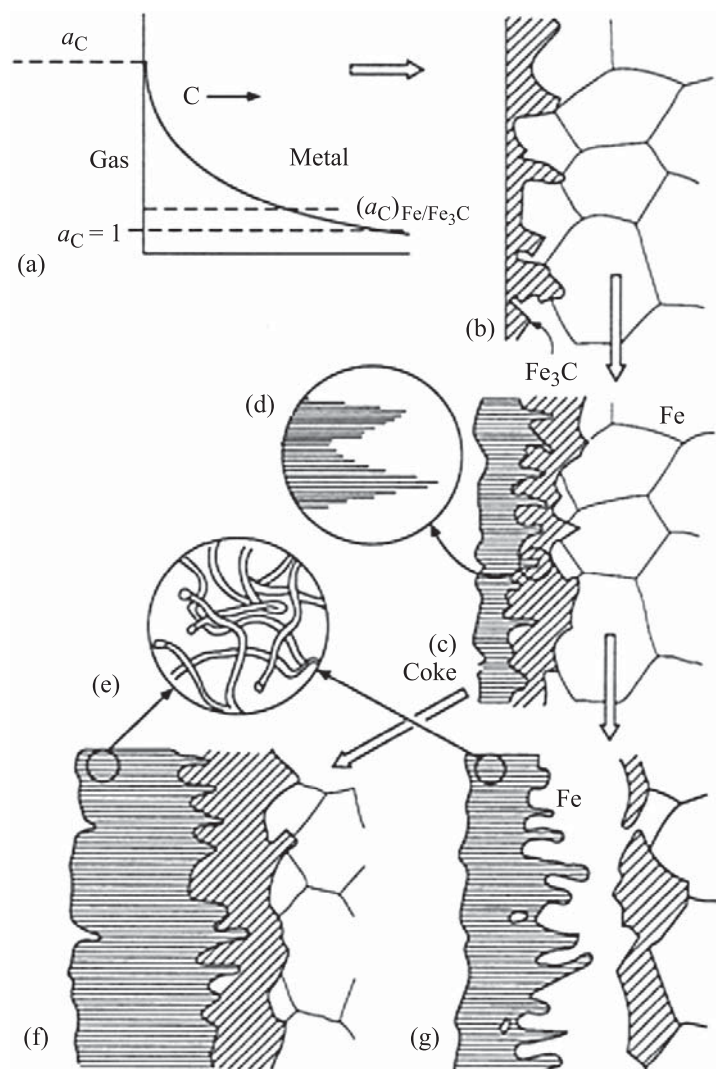


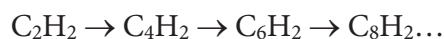
Рис. 1. Схема механизма процесса Metal dusting [8]

Коррозионно-стойкие стали, содержащие, кроме Fe, еще Cr, Ni и легирующие добавки, также подвержены процессу Metal dusting [11].

Второй механизм образования углеродных отложений связан с наличием в потоке газа углеродных частиц, которые осаждаются на стенку. Углеродные частицы в потоке газа (сажа) образуются в результате химических реакций горения в условиях избытка горючего. В соответствии с одним из наиболее вероятных механизмов [13, 14] образованию каждой сажевой частицы предшествует образование зародыша. Под зародышем понимается минимальная частица, имеющая физическую поверхность и способная к дальнейшему росту. Очевидно, что такой зародыш, несмотря на субмикронный размер, включает в себя большое число атомов и молекул. Однако необходимое для образования такого зародыша число молекул не может вступить в реакцию одновременно, поэтому несомненно, что образование зародыша сажевой частицы имеет сложную природу и состоит из ряда последовательных элементарных стадий. В [13] выделены следующие характерные стадии:

- образование радикала-зародыша;
- образование зародыша из радикала-зародыша;
- рост зародыша до частицы сажи.

На каждой стадии происходит обогащение растущего зародыша углеродом (как за счет химических реакций, так и за счет коагуляции), которое продолжается до тех пор, пока он не превратится в частицу сажи. Представление о том, что происходит постепенное укрупнение зародыша в силу обогащения его углеродом, экспериментально подтверждено в [15]. Авторы, исследуя в ударной трубе разложение ацетиленов с помощью масс-спектрографа, обнаружили следующую радикальную цепь:



В состав восстановительного кислородно-метанового генераторного газа входят CO, H₂O, H₂, а в материал стенки газового тракта — железо, что создает условия для процесса Metal dusting и образования углеродных отложений непосредственно на стенке за счет гетерогенных реакций. Сажа также присутствует в потоке восстановительного генераторного газа и может осаждаться на стенке. Поэтому в условиях газового тракта могут реализоваться оба рассмотренных механизма образования углеродных отложений (образование углерода сразу непосредственно на стенке и осаждение углерода на стенку из потока в виде сажи), причем они могут действовать одновременно (параллельно) на одном и том же участке поверхности.

Кроме того, в дополнение к описанному разнообразию механизмов образования углеродных отложений еще необходимо указать, что эти отложения неравномерно распределены по газовому тракту.

Вследствие разнообразия происходящих в газовом тракте явлений и большого числа влияющих факторов в настоящий момент создание достаточно полной и точной теории практически невозможно. Поэтому для работы выбран метод экспериментального исследования процессов в модельном газовом тракте, включая процесс образования углеродных отложений на типичных для газового тракта ЖРД конструкционных материалах в среде движущегося кислородно-метанового восстановительного генераторного газа.

Экспериментальная установка и полученные результаты. Отметим некоторые особенности газовых трактов ЖРД, принятые во внимание при выборе тактико-технических характеристик экспериментальной установки.

Во-первых, в проработках облика перспективных ЖРД и для реально существующих ЖРД [1–4] выбраны следующие характерные параметры кислородно-метанового газа в восстановительном газогенераторе: температура $T_{\text{виг}} = 770 \dots 1070$ К; давление $p_{\text{виг}} = 30 \dots 60$ МПа; $K_{\text{виг}} = 0,25 \text{--} 0,45$ (соотношение компонентов в восстановительном газогенераторе).

Во-вторых, в результате эксплуатации ЖРД и разных экспериментальных установок выявлено, что на поверхности лопаток соплового аппарата и рабочего колеса турбины слой углеродных отложений очень тонкий и прочный, а в подводящих и отводящих патрубках, во входном распределительном коллекторе соплового аппарата турбины, на фронтальной и тыльной поверхностях диска рабочего колеса турбины углеродные отложения существенно более толстые, менее прочные и легко отслаивающиеся. Отметим, что характерной особенностью областей газового тракта с практически отсутствующим осадком является высокая скорость течения газа, а в областях с большим количеством осадка (патрубки, коллекторы, зазоры, застойные зоны, зоны обратных токов и др.) скорость газа очень невелика. Корреляция отсутствия осадка и высокой локальной скорости потока указывает на то, что на участках газового тракта с высокой скоростью течения внешняя часть отложений, напрямую не связанная с основанием и поэтому менее прочная, сдувается высокоскоростным потоком с поверхности газового тракта. Такое постоянное разрушение отложений газовым потоком не позволяет накопиться на стенке сколь-нибудь существенному их количеству. Очевидно, что наиболее интересными для исследования являются области с малой скоростью течения газового потока как

наиболее опасные (при прочих равных условиях) из-за накопления больших количеств углеродных отложений и возможности последующего их скалывания со стенки в виде относительно крупных фрагментов.

Рассмотренные особенности газового тракта ЖРД учитывались при выборе тактико-технических характеристик экспериментальной установки.

Созданная для проведения настоящего исследования экспериментальная установка представляет собой модельный газовый тракт с характеристиками, как можно более близкими к ожидаемым характеристикам натурального газового тракта. Рабочим телом является кислородно-метановый генераторный газ с $K_{гг} = 0,3-0,5$, скорость течения в основной части модельного тракта ~ 20 м/с, а время пребывания $\tau_{пр} \approx 0,02...0,03$ с; материал тракта — сталь 12Х18Н10Т; давление $p_{гг} \leq 2$ МПа, что многократно меньше натурального, однако состав генераторного газа слабо зависит от давления и поэтому такое отличие является допустимым. Малый расход генераторного газа через газовый тракт позволяет при необходимости довести длительность огневого испытания до 1200 с.

Общий вид модельного кислородно-метанового газового тракта приведен на рис. 2. Модельный газовый тракт условно можно разделить на три участка. Участок I, состоящий из цилиндра 4 с охлаждаемой стенкой и турбулизатора 5, совместно с однофорсуночной смесительной головкой 1, можно рассматривать как аналог натурального газогенератора с балластировочной решеткой (некоторые особенности течения газа в такой решетке воспроизводятся в турбулизаторе, который выполнен в виде последовательно расположенных кольцевого выступа стенки и закрепленного на двух пилонах центрального тела). Участки II и III имеют внутренний диаметр 20 мм и представляют собой аналог малоскоростных участков натурального газового тракта с максимальной интенсивностью образования отложений. Выходное сопло 10 с критическим сечением диаметром 4 мм является аналогом соплового аппарата турбины.

Головка камеры газогенератора однофорсуночная. Форсунка сооснотруйная с подачей газообразного кислорода в центральный канал и подачей газообразного метана в наружный кольцевой канал. Такой тип смесительных элементов предусматривается как штатный в некоторых натуральных двигателях.

Зажигание осуществляется с помощью запальника (см. рис. 2), который работает в течение первых двух секунд каждого испытания. Небольшие объемы газообразных кислорода и метана (с соотношением компонентов больше, чем $K_{гг}$) подаются отдельно в зазор между корпусом

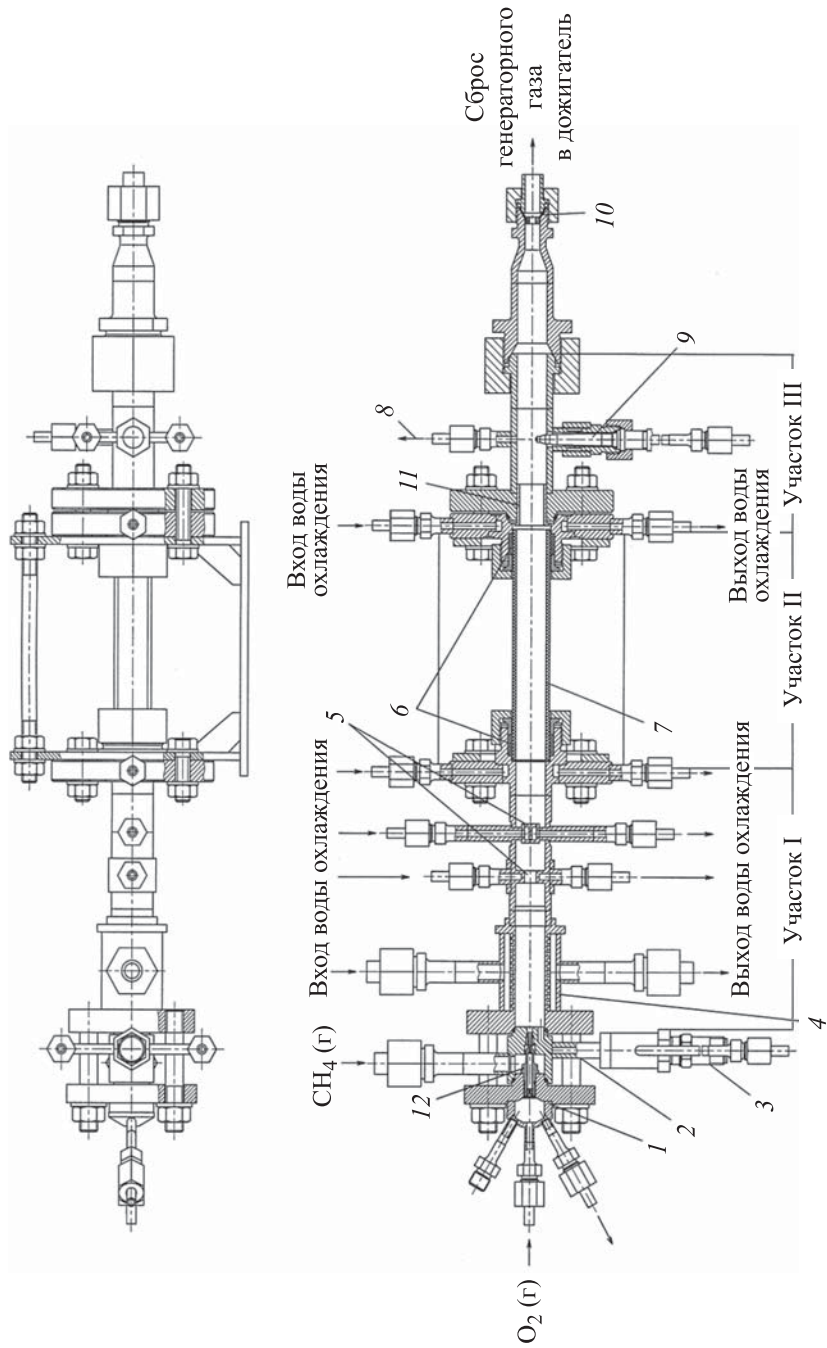


Рис. 2. Общий вид модельного газового тракта:

1 — смесительная головка; 2 — запальник; 3 — электросвеча СПН-4-3-Г; 4 — охлаждаемый участок; 5 — турбулизатор; 6 — асбестовая набивка; 7 — кварцевая трубка; 8 — магистраль сброса (отбора) генераторного газа; 9 — термопара; 10 — выходное сопло; 11 — цилиндрический вкладыш из стали 12Х18Н10Т; 12 — форсунка

электросвечи СПН-4-3-Т и стенкой канала. Попадая в область кольцевого разряда электросвечи, они образуют плазму с большим числом активных радикалов, эта плазма поджигает смесь кислорода с метаном в запальнике. Продукты сгорания из запальника, двигаясь по специальному каналу в смесительной головке, попадают в огневую полость за форсункой и воспламеняют основной расход компонентов. Цилиндрический участок расположен возле головки, обе части турбулизатора и фланцы участка II имеют наружное водяное охлаждение, система подачи компонентов — вытеснительная.

В ходе каждого огневого испытания измеряли температуру генераторного газа $T_{гг(изм)}$ (с помощью хромель-алюмелевой термопары), давление в газогенераторе (датчиком ЗОНД-10-ИД 1025М), расходы компонентов (сужающими устройствами) и некоторые другие вспомогательные параметры.

Непосредственно за кварцевой трубкой устанавливали тонкостенный цилиндрический вкладыш из стали 12Х18Н10Т (см. рис. 2). На каждом испытании использовали новую трубку и новый вкладыш. Для определения массы образовавшегося на этих деталях осадка кварцевую трубку и металлический вкладыш взвешивали до и после испытания. Это позволило в практически идентичных условиях сравнить интенсивности образования углеродного осадка на разных материалах (кварц и коррозионно-стойкая сталь).

Каждое испытание проводили при постоянном режиме работы генератора. Осредненную по длительности испытания скорость образования осадка на единице площади поверхности определяли как

$$\dot{m} = \Delta m / (\tau F),$$

где Δm — масса отложений, накопившихся за время испытания; τ — длительность испытания; F — площадь поверхности, на которой накопились отложения (внутренняя поверхность кварцевой трубки или цилиндрического вкладыша).

Полученные таким образом скорости образования отложений на кварцевой поверхности и стали 12Х18Н10Т приведены на рис. 3.

Выводы. Образование углеродного осадка на стенке в условиях тракта кислородно-метанового восстановительного генераторного газа может происходить двумя путями: за счет протекания поверхностных химических реакций (процесс Metal dusting) и осаждения содержащихся в потоке газа сажевых частиц. Наличие сажи в потоке зафиксировано по загрязнению кварцевых фильтров (Quartz Microfibre Filter QFH 0425)

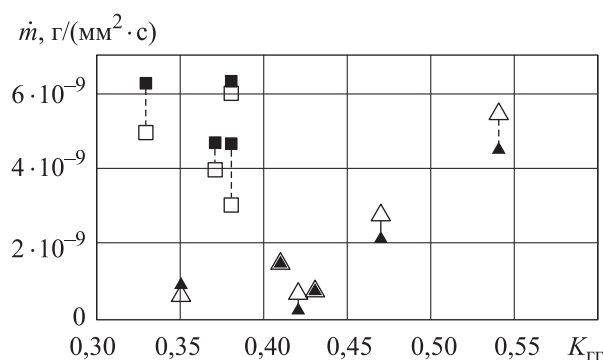


Рис. 3. Скорость образования осадка на кварце и стали 12Х18Н10Т:
 □ △ — кварцевая трубка; ■ ▲ — стальной образец

в серии дополнительных опытов с пропусканием через эти фильтры части газа из модельного тракта. Процесс Metal dusting также имел место, это установлено по результатам электронной микроскопии (рис. 4) внутренней поверхности цилиндрического вкладыша из стали 12Х18Н10Т, выполненной на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 600 FEG. Осадок, кроме аморфного углерода (сажи), содержит еще и спиральные углеродные трубки с частицами металла (светлые пятна в правом нижнем углу изображения, полученного на детекторе BSED, см. рис. 4). Присутствие металлических частиц в углеродных трубках является специфическим характерным признаком процесса Metal dusting, что подтверждает наличие этого процесса на образцах из стали 12Х18Н10Т.

С одной стороны, кварц в рассматриваемых условиях химически пассивен и не содержит металла, поэтому образование осадка на его поверхности происходит без участия процесса Metal dusting, т. е. только за счет осаждения сажи из потока. С другой стороны, на металлическом вкладыше происходят оба процесса (процесс Metal dusting и осаждение сажи из потока). Поскольку на сравниваемых образцах интенсивность выпадения сажи из потока одна и та же, можно ожидать, что скорость роста массы отложений на металлическом образце будет выше, чем на кварцевой трубке из-за дополнительного вклада процесса Metal dusting. Однако, как следует из рис. 3, уровень скорости отложений на стали 12Х18Н10Т практически такой же, как на кварцевой поверхности. Из этого следует, что вклад процесса Metal dusting в образование углеродного осадка на штатной металлической поверхности газового тракта пренебрежимо мал, а основным механизмом образования углеродного осадка является осаждение на стенке содержащейся в потоке генераторного газа сажи.

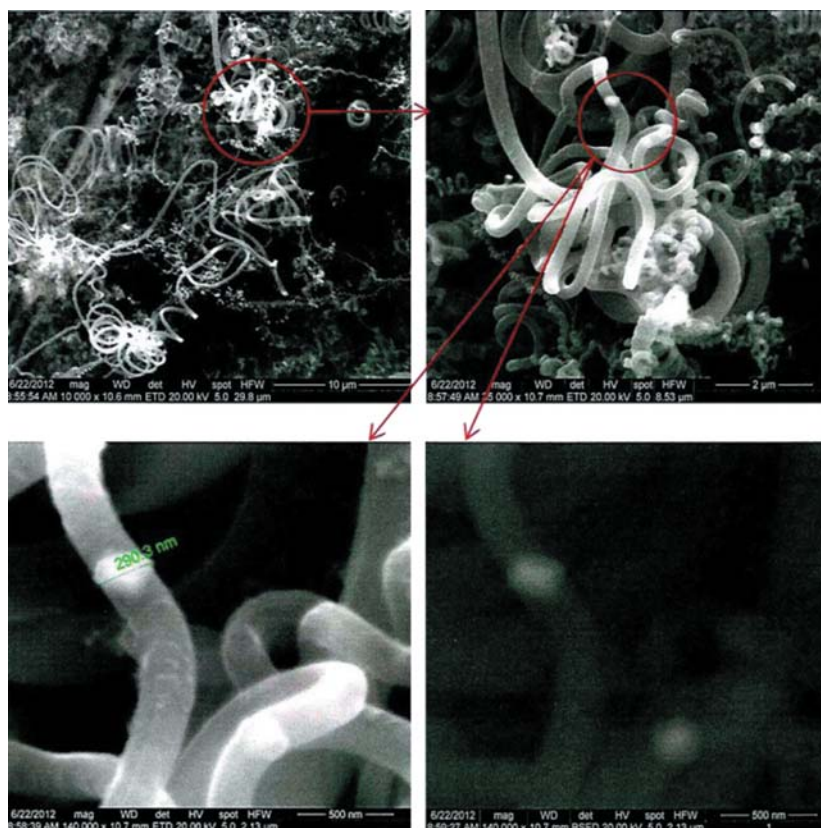


Рис. 4. Углеродные трубки на поверхности осадка, содержащие частицы металла

Дополнительно по результатам настоящего исследования установлено существование диапазона соотношения компонентов в модельном газогенераторе, в котором осаждение минимально (см. рис. 3). Полученные результаты актуальны при разработке перспективных ЖРД как в части непосредственного использования этих результатов в проектировании, так и для верификации расчетных методик.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кислородно-метановый двигатель. *kbhmisaeva.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.kbhmisaeva.ru> (дата обращения: 15.06.2022).
- [2] Межпланетная программа SpaceX: подробный разбор ЖРД «Raptor». *habr.com: веб-сайт*. URL: <http://habr.com/ru/post/404933> (дата обращения: 15.06.2022).
- [3] Покончить с американской зависимостью от двигателя РД-180 российского производства. *naukatehnika.com: веб-сайт*. URL: <http://naukatehnika.com/raketnye-dvigateli-bezosa-be-3u-i-be-4.html> (дата обращения: 15.06.2022).

- [4] Ракетные двигатели АО КБХА. *kbkha.ru: веб-сайт*.
URL: <https://kbkha.ru/deyatel-nost/raketnye-dvigateli-ao-kbha/rd0177> (дата обращения: 15.06.2022).
- [5] Grabke H.J., Krajak R., Nava Paz J.C. On the mechanism of catastrophic carburization: metal dusting. *Corros. Sc.*, 1993, vol. 35, no. 5-8, pp. 1141–1150.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90334-D](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90334-D)
- [6] Grabke H.J., Krajak R., Muller-Lorenz E.M., et al. Metal dusting of nickel-base alloys. *Werkst. Korros.*, 1996, vol. 47, no. 9, pp. 495–504.
DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.19960470904>
- [7] Grabke H.J., Schutze M. Corrosion by carbon and nitrogen. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2007.
- [8] Grabke H.J. Metal dusting of low- and high-alloy steels. *CORROSION/51*. Houston, NACE International, 1995, pp. 711–720.
- [9] Chun C.M., Mumford J.D., Ramanarayananb T.A. Mechanisms of metal dusting corrosion of iron. *J. Electrochem. Soc.*, 2002, vol. 149, no. 7, pp. 348–355.
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1483099>
- [10] Chun C.M., Ramanarayananb T.A. Mechanism and control of carbon deposition on high temperature alloys. *J. Electrochem. Soc.*, 2007, vol. 154, no. 9, pp. 465–471.
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2750447>
- [11] Chun C.M., Bhargava Z.G., Ramanarayananb T.A. Metal dusting corrosion of nickel-based alloys. *J. Electrochem. Soc.*, 2007, vol. 154, no. 5, pp. 231–240.
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2710215>
- [12] Abelev E., Ramanarayananb T.A., Bernasekz S.L. Iron corrosion in CO₂/brine at low H₂S. *J. Electrochem. Soc.*, 2009, vol. 156, no. 9, pp. 331–339.
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3160373>
- [13] Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. М., Химия, 1972.
- [14] Теснер П.А., Кнорре В.Г. Аналитическое описание процесса образования сажевых частиц при термическом разложении углеводородов. *Физика горения и взрыва*, 1970, № 3, с. 386–390.
- [15] Gay I.D., Kistiakowsky G.B., et al. Thermal decomposition of acetylene in shock waves. *J. Chem. Phys.*, 1965, vol. 43, no. 5, art. 1720.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1696996>

Федоров Сергей Алексеевич — инженер 2-й категории АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

Слесарев Денис Федорович — ведущий инженер АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

Исаков Дмитрий Владимирович — научный сотрудник АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Федоров С.А., Слесарев Д.Ф., Исаков Д.В. Экспериментальное исследование накопления углеродных отложений в кислородно-метановом модельном газовом тракте. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 1 (144), с. 52–66. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-52-66>

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE CARBON DEPOSITS
ACCUMULATION IN THE OXYGEN-METHANE
MODEL GAS PATH**

S.A. Fedorov

shamusmacduly@gmail.com

D.F. Slesarev

dendom68@mail.ru

D.V. Isakov

isakovd93@gmail.com

JSC SSC “Center Keldysh”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers mechanisms of the carbon deposits formation on the metal surface at contact with the gas phase containing products of incomplete combustion of the oxygen-methane generator gas. The first mechanism is the so-called mechanism of metal dust formation, which products remain on the wall surface and form the carbon deposits, the second is the mechanism of carbon deposits formation associated with the carbon particles in the gas flow, which are being deposited on the wall. An experimental system was developed with the working section being a model path of the oxygen-methane generator gas of the reducing composition; and accumulation of the carbon deposits was experimentally studied. When selecting performance characteristics of the experimental system, features of the liquid rocket engine gas path were taken into account; therefore, the experimental system was having characteristics closer to the expected characteristics of the full-scale gas path. Intensities of the deposit formation on samples of metallic material and reference quartz were compared. It was established that the main mechanism for the carbon deposits formation was precipitation of soot contained in the generator gas flow onto the wall of the gas path. The number of deposits was determined by weight. The range of the fuel components ratio was identified, where formation of the deposits was minimal

Keywords

Liquid propellant rocket engine, reducing generator gas, carbon deposits, soot

Received 07.04.2022

Accepted 19.04.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Kislородno-metanovyy dvigatel [Oxygen-methane engine]. *kbhmisaeva.ru: wesite* (in Russ.). Available at: <http://www.kbhmisaeva.ru> (accessed: 15.06.2022).
- [2] Mezoplanetnaya programma SpaceX: podrobnyy razbor ZhRD "Raptor" [SpaceX's interplanetary program: detailed analysis of the Raptor liquid rocket engine]. *habr.com: wesite* (in Russ.). Available at: <http://habr.com/ru/post/404933> (accessed: 15.06.2022).
- [3] Pokonchit s amerikanskoy zavisimostyu ot dvigatelya RD-180 rossiyskogo proizvodstva [To end American dependence on the Russian-made RD-180 engine]. *naukatehnika.com: wesite* (in Russ.). Available at: <http://naukatehnika.com/raketnye-dvigateli-bezosa-be-3u-i-be-4.html> (accessed: 15.06.2022).
- [4] Raketnye dvigateli AO KBKhA [Rocket engines of AO KBKhA]. *kbkha.ru: wesite* (in Russ.). Available at: <https://kbkha.ru/deyatel-nost/raketnye-dvigateli-ao-kbha/rd0177> (accessed: 15.06.2022).
- [5] Grabke H.J., Krajak R., Nava Paz J.C. On the mechanism of catastrophic carburization: metal dusting. *Corros. Sc.*, 1993, vol. 35, no. 5-8, pp. 1141–1150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90334-D](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90334-D)
- [6] Grabke H.J., Krajak R., Muller-Lorenz E.M., et al. Metal dusting of nickel-base alloys. *Werkst. Korros.*, 1996, vol. 47, no. 9, pp. 495–504. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.19960470904>
- [7] Grabke H.J., Schutze M. Corrosion by carbon and nitrogen. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2007.
- [8] Grabke H.J. Metal dusting of low- and high-alloy steels. *CORROSION/51*. Houston, NACE International, 1995, pp. 711–720.
- [9] Chun C.M., Mumford J.D., Ramanarayananb T.A. Mechanisms of metal dusting corrosion of iron. *J. Electrochem. Soc.*, 2002, vol. 149, no. 7, pp. 348–355. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1483099>
- [10] Chun C.M., Ramanarayananb T.A. Mechanism and control of carbon deposition on high temperature alloys. *J. Electrochem. Soc.*, 2007, vol. 154, no. 9, pp. 465–471. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2750447>
- [11] Chun C.M., Bhargava Z.G., Ramanarayananb T.A. Metal dusting corrosion of nickel-based alloys. *J. Electrochem. Soc.*, 2007, vol. 154, no. 5, pp. 231–240. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2710215>
- [12] Abelev E., Ramanarayananb T.A., Bernasekz S.L. Iron corrosion in CO₂/brine at low H₂S. *J. Electrochem. Soc.*, 2009, vol. 156, no. 9, pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3160373>
- [13] Tesner P.A. Obrazovanie ugleroda iz uglevodorodov gazovoy fazy [Formation of carbon from hydrocarbons in the gas phase]. Moscow, Khimiya Publ., 1972.
- [14] Tesner P.A., Knorre V.G. Analytical description of soot particles formation during thermal decomposition of hydrocarbons. *Fizika goreniya i vzryva*, 1970, no. 3, pp. 386–390 (in Russ.).

[15] Gay I.D., Kistiakowsky G.B., et al. Thermal decomposition of acetylene in shock waves. *J. Chem. Phys.*, 1965, vol. 43, no. 5, art. 1720.

DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1696996>

Fedorov S.A. — Engineer of the 2nd category, JSC SSC “Center Keldysh” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

Slesarev D.F. — Lead Engineer, JSC SSC “Center Keldysh” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

Isakov D.V. — Research Fellow, JSC SSC “Center Keldysh” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fedorov S.A., Slesarev D.F., Isakov D.V. Experimental study of the carbon deposits accumulation in the oxygen-methane model gas path. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 1 (144), pp. 52–66 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-52-66>